

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

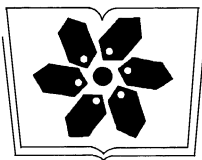
Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 14 期 Vol.32 No.14 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 14 期

2012 年 7 月 (半月刊)

目 次

海滨沙地砂引草对沙埋的生长和生理适应对策.....	王 进,周瑞莲,赵哈林,等 (4291)
外源 K ⁺ 和水杨酸在缓解融雪剂对油松幼苗生长抑制中的效应与机理 ...	张 营,李法云,严 霞,等 (4300)
钱塘江中游流域不同空间尺度环境因子对底栖动物群落的影响.....	张 勇,刘朔孺,于海燕,等 (4309)
贡嘎山东坡非飞行小型兽类物种多样性的垂直分布格局.....	吴永杰,杨奇森,夏 霖,等 (4318)
基于斑块的红树林空间演变机理分析方法.....	李春干,刘素青,范航清,等 (4329)
亚热带六种天然林树种细根养分异质性.....	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (4343)
浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应	何 月,樊高峰,张小伟,等 (4352)
亚热带 6 种天然林树种细根呼吸异质性.....	郑金兴,熊德成,黄锦学,等 (4363)
亚高山/高山森林土壤有机层氨氧化细菌和氨氧化古菌丰度特征	王 奥,吴福忠,何振华,等 (4371)
耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响.....	张军科,江长胜,郝庆菊,等 (4379)
火烧对长期封育草地土壤碳固持效应的影响.....	何念鹏,韩兴国,于贵瑞,等 (4388)
闽江河口潮汐湿地二氧化碳和甲烷排放化学计量比.....	王维奇,曾从盛,仝 川,等 (4396)
2010 年夏季珠江口海域颗粒有机碳的分布特征及其来源	刘庆霞,黄小平,张 霞,等 (4403)
新疆冷泉沉积物葡萄糖利用细菌群落多样性的稳定同位素标记分析.....	楚 敏,王 芸,曾 军,等 (4413)
土壤微生物群落多样性解析法:从培养到非培养.....	刘国华,叶正芳,吴为中 (4421)
伊洛河河岸带生态系统草本植物功能群划分	郭屹立,卢训令,丁圣彦 (4434)
濒危植物蒙古扁桃不同地理种群遗传多样性的 ISSR 分析	张 杰,王 佳,李浩宇,等 (4443)
强潮区较高纬度移植红树植物秋茄的生理生态特性.....	郑春芳,仇建标,刘伟成,等 (4453)
冬季高温对白三叶越冬和适应春季“倒春寒”的影响	周瑞莲,赵 梅,王 进,等 (4462)
中亚热带细柄阿丁枫和米槠群落细根的生产和死亡动态.....	黄锦学,凌 华,杨智杰,等 (4472)
欧美杨水分利用效率相关基因 <i>PdEPF1</i> 的克隆及表达	郭 鹏,金 华,尹伟伦,等 (4481)
再力花地下部水浸提液对几种水生植物幼苗的化感作用.....	缪丽华,王 媛,高 岩,等 (4488)
无致病力青枯雷尔氏菌对烟草根系土壤微生物脂肪酸生态学特性的影响.....	郑雪芳,刘 波,蓝江林,等 (4496)
基于更新和同化策略相结合的遥感信息与水稻生长模型耦合技术的研究.....	王 航,朱 艳,马孟莉,等 (4505)
温度和体重对克氏双锯鱼仔鱼代谢率的影响.....	叶 乐,杨圣云,刘 敏,等 (4516)
夏季西南印度洋叶绿素 a 分布特征.....	洪丽莎,王春生,周亚东,等 (4525)
大沽排污河生态修复河道水质综合评价及生物毒性影响.....	王 敏,唐景春,朱文英,等 (4535)
李肖叶甲成虫数量及三维空间格局动态.....	汪文俊,林雪飞,邹运鼎,等 (4544)
专论与综述	
基于景观格局的城市热岛研究进展	陈爱莲,孙然好,陈利顶 (4553)
沉积物质量评价“三元法”及其在近海中的应用	吴 斌,宋金明,李学刚,等 (4566)
问题讨论	
中国餐厨垃圾处理的现状、问题和对策	胡新军,张 敏,余俊锋,等 (4575)
研究简报	
稻秸蓝藻混合厌氧发酵沼液及其化学物质对尖孢镰刀菌西瓜专化型生长的影响.....	刘爱民,徐双锁,蔡 欣,等 (4585)
佛山市农田生态系统的生态损益.....	叶延琼,章家恩,秦 钟,等 (4593)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 33 * 2012-07



封面图说: 噶龙山南坡的高山湖泊——喜马拉雅山南坡的噶龙山光照强烈、雨量充沛,尽管是海拔 4500 多米的高寒地区,山上的草甸依然泛着诱人的翠绿色,冰川和雪山的融水汇集在山梁的低洼处形成了一个又一个的高山湖泊,由于基底的差别和水深的不同,使得纯净清澈的冰雪融水在湖里呈现出不同的颜色,湖面或蓝或绿,颜色或深或浅,犹如一块块通透透明的翡翠镶嵌在绿色的绒布之中。兰天下面,白云落在山间,通往墨脱的公路像丝带一样随随便便地缠绕着,一幅美丽的自然生态画卷就这样呈现在你的面前。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201107161058

张营, 李法云, 严霞, 李霞, 程志辉, 沈曼莉, 荣湘民. 外源 K^+ 和水杨酸在缓解融雪剂对油松幼苗生长抑制中的效应与机理. 生态学报, 2012, 32 (14): 4300-4308.

Zhang Y, Li F Y, Yan X, Li X, Cheng Z H, Shen M L, Rong X M. Alleviation effect and mechanism of exogenous potassium nitrate and salicylic acid on the growth inhibition of *Pinus tabulaeformis* seedlings induced by deicing salts. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (14): 4300-4308.

外源 K^+ 和水杨酸在缓解融雪剂对油松幼苗 生长抑制中的效应与机理

张 营^{1,2}, 李法云^{2,1,*}, 严 霞³, 李 霞^{1,3}, 程志辉^{1,3}, 沈曼莉^{1,3}, 荣湘民¹

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2. 辽宁石油化工大学生态环境研究院, 抚顺 113001;

3. 辽宁大学环境学院, 沈阳 110036)

摘要: 随着融雪剂在国内外寒冷地区的广泛应用及其在城市使用量的逐年增加, 融雪剂对城市生态环境的危害引起了广泛的重视。其中, 融雪剂在城市道路土壤中的积累对植物生长的影响已日益凸现。以油松幼苗为材料, 通过分析 0.2% 浓度融雪剂胁迫下外源钾 (K^+) 和水杨酸 (salicylic acid, SA) 对油松幼苗各生长生理指标的影响, 探讨外源 K^+ 和 SA 在缓解融雪剂对油松幼苗生长抑制中的机理与剂量效应关系。结果表明, 0.2% 浓度的融雪剂处理对油松生长有明显的抑制作用, 而 20 mmol/L KNO_3 和 2 mmol/L SA 能明显诱导过氧化物酶 (peroxidase, POD) 活性的增强, 缓解膜脂过氧化作用, 降低丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 在叶片中的积累, 维持细胞膜的稳定性。虽然外源 K^+ 和 SA 对油松幼苗叶片胞间 CO_2 浓度 (intracellular CO_2 concentrations, C_i) 和气孔导度 (stomatal conductance, G_s) 的缓解作用并不显著, 但其可通过提高叶绿素含量促进光合作用的进行, 缓解融雪剂胁迫对油松幼苗生长的抑制, 分别增加生物量 24.9% 和 63.6%。可见, 20 mmol/L KNO_3 和 2 mmol/L SA 处理能有效缓解融雪剂对油松幼苗的伤害, 为城市化学融雪剂的污染防治提供科学依据。

关键词: 油松; 融雪剂; 水杨酸; 过氧化物酶; 丙二醛; 光合特性; 缓解效应

Alleviation effect and mechanism of exogenous potassium nitrate and salicylic acid on the growth inhibition of *Pinus tabulaeformis* seedlings induced by deicing salts

ZHANG Ying^{1,2}, LI Fayun^{2,1,*}, YAN Xia³, LI Xia^{1,3}, CHENG Zhihui^{1,3}, SHEN Manli^{1,3}, RONG Xiangmin¹

1 School of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China

2 Institute of Eco-environmental Sciences, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China

3 School of Environmental Science, Liaoning University, Shenyang 110036, China

Abstract: Large quantities of deicing salts are applied in urban areas for clearing the pavement and ensuring the normal traffic flow during the winter seasons in northeastern China. The salt from deicing operation has been observed to accumulate in roadside soil and inhibit the growth of vegetation. It was reported that the application of exogenous K^+ and salicylic acid (SA) could protect plants against abiotic stress. In this study, pot experiments were performed in soil culture to test the efficacy of two soil additives, potassium nitrate (KNO_3) and SA, in alleviating the stress of deicing salts on growth and photosynthetic parameters of *Pinus tabulaeformis* seedlings. Three soil additive levels were used i. e. 10, 20, 40 mmol/L for KNO_3 and 2, 4, 8 mmol/L for SA, respectively, under the stress of 0.2% deicing salts per dry weight of soil. After the

基金项目: 国家自然科学基金 (41071317); 辽宁省自然科学基金 (20092013); 辽宁“百千万人才工程”资助项目 (2008921082); 沈阳市科技计划项目 (F10-205-1-64); 辽宁大学“211”工程第三期重点学科资助项目 (HJ211001); 辽宁大学省重点学科与辽宁省高校污染控制与环境修复重点实验室开放基金 (HJ200907)

收稿日期: 2011-07-16; 修订日期: 2011-11-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lifayun15@hotmail.com

treatment for 20 days (d), relative water content, leakage rates of electrolyte, malondialdehyde (MDA), peroxidase (POD) and chlorophyll content in leaves were determined. Dry weight of roots, stems and leaves were measured respectively after 60 d of treatments. Three important parameters of photosynthesis, photosynthetic rates (P_n), intracellular CO_2 concentrations (C_i) and stomatal conductance (G_s) were measured every 7 d until 35 d.

The results showed that the growth of seedlings was inhibited significantly by the stress of 0.2% deicing salts. The dry weight and relative water content of roots, stems and leaves under 0.2% deicing salt stress were decreased significantly in comparison with the control seedlings. The leaves of *Pinus tabulaeformis* were more sensitive to the stress of deicing salts compared with roots and stems. However, the treatment of 20 mmol/L KNO_3 and 2 mmol/L SA to 0.2% deicing salts had high dry weight and water content. Meanwhile, the MDA content and leakage rates of electrolyte increased once exposure to 0.2% deicing salts, and salts exposure also had an inhibitory effect on the activities of the POD. However, with the addition of 20 mmol/L KNO_3 and 2 mmol/L SA, the high stability of membrane was improved by promoting the POD activities, with decreasing plasmalemma permeability and MDA content in leaves. On the other hand, the contents of P_n , C_i , G_s and the chlorophyll all decreased in the *Pinus tabulaeformis* seedlings by the treatment of 0.2% deicing salts. The addition of 20 mmol/L KNO_3 significantly increased photosynthetic rates from 5.77% to 20.6% with the prolonging of the exposure time. However, other treatments were found no obvious alleviation effect. It was also found that the contents of C_i and G_s remained unchanged in leaves of *Pinus tabulaeformis* seedlings in all alleviation treatments, but the enhancing of chlorophyll contents played a key role in maintaining the leaf photosynthetic rate under the treatment of KNO_3 and SA. The results indicated that the salt tolerance of *Pinus tabulaeformis* seedlings was improved by using soil additives of 20 mmol/L KNO_3 and 2 mmol/L SA. Exogenous K^+ and SA showed strong benefits against deicing salts-induced negative symptoms.

Key Words: *Pinus tabulaeformis*; deicing salts; salicylic acid; peroxidase; malondialdehyde; photosynthetic characteristics; alleviation effect

化学融雪剂的主要成分为 $NaCl$ 和 $CaCl_2$, 用于清除道路积雪具有操作简便、价格低廉及融雪效果良好等优点, 在国内外的寒冷地区应用广泛。随着化学融雪剂施用量的逐年增加, 其对城市土壤环境、地表水、地下水、植物和动物等的危害受到广泛关注^[1]。其中, 融雪剂在道路两旁植被中的积累对植物生长的影响已日益凸现^[2-3]。融雪剂对植物的伤害主要是通过含盐水在土壤中蓄积, 引起土壤盐分过高, 被植物吸收滞留在植物组织中, 对植物造成盐害胁迫, 且盐害附近几米范围内的植被生长均受化学融雪剂的影响^[1,4]。融雪剂抑制植物生长的作用机理主要包括 3 个方面: 其一, 渗透胁迫导致的植物水分亏缺; 其二, 土壤中高浓度的 Na 和 Cl 离子对植物的毒害作用; 其三, 破坏植物包括光合作用、呼吸作用和蛋白质合成等方面的正常代谢^[1,5-6]。其影响因植物的种类和融雪剂的离子组分而异, 但一般都表现出植物生物量积累的下降、叶片黄褐化, 甚至导致植株死亡^[7-8]。目前, 国内外有关融雪剂对植物生长的影响的大部分研究多集中于植物表观特征^[1,9-11], 而对融雪剂污染的防治措施及其胁迫下植株的缓解效应与机理的研究报导鲜见。

研究表明, 适宜浓度的外源 K^+ 和水杨酸 (salicylic acid, SA) 对盐胁迫下植物的生长抑制具有缓解作用^[12-15]。加入外源 K^+ 可能通过抑制植物对 Na^+ 的吸收, 缓解高浓度特定离子对植物的毒害作用。晏斌等^[16]研究了外界 K^+ 水平对水稻幼苗耐盐性的影响, 结果表明, K^+ 作用大小与外界 Na^+/K^+ 比值有关; 降低外界 Na^+/K^+ 比, 更有利于植物对 K^+ 吸收, 以保持体内稳定的 Na^+/K^+ 比, 缓解 $NaCl$ 胁迫对植物生长造成的影响, 但过多的 K^+ 同样不利于植物生长。外源 SA 可能通过提高 SOD 和 POD 等活性氧清除系统酶的活性, 清除体内过多的活性氧, 降低膜脂过氧化水平, 改善细胞的代谢, 最终缓解盐胁迫对幼苗生长的抑制作用^[14-15]。张士功等^[17]的研究表明, 盐胁迫条件下 0.1 g/L SA 和 0.2 g/L 阿斯匹林能显著提高小麦种子发芽率、发芽指数和活力指数, 以及幼苗叶片的相对含水量, 降低叶片质膜透性, 提高幼苗体内超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶 (peroxidase, POD) 等细胞保护酶的活性, 减少膜脂过氧化产物丙二醛

(malondialdehyde,MDA)的积累。Khodary^[18]报道,盐胁迫条件下SA处理能提高玉米的抗盐性,可能是通过提高它们的光合功能和碳水化合物代谢。在Nazar等^[19]的研究中,SA通过诱导硝酸还原酶(nitrate reductase,NR)和ATP硫酸化酶(ATP-sulfurylase,ATPs)的活性,缓解绿豆幼苗盐胁迫引起的光合作用抑制。余小平等^[20]发现200 mmol/L NaCl胁迫条件下,加入1 mmol/L SA可使营养液培养的黄瓜幼苗SOD和POD活性增加,分别是单纯盐胁迫处理的1.11倍和1.25倍及对照的2.46倍和1.80倍,膜脂过氧化产物MDA含量则显著低于单纯盐胁迫处理。然而,植株体内SA积累过高会导致盐害症状加剧的可能^[21]。

油松(*Pinus tabulaeformis*)是我国北方城市最主要的造林绿化树种之一,具有较高的生态保护和园林绿化价值,近年来由于城市街道融雪剂胁迫效应的积累,油松衰亡量正逐年递增^[22-23]。根据目前国内外有关融雪剂对植物生长影响的相关研究中,融雪剂胁迫下外源K⁺和SA对植物受抑的缓解效应与机理研究尚未见报道。为此,本试验研究化学融雪剂胁迫下,外源K⁺和SA对油松幼苗生长抑制的缓解作用,分析融雪剂胁迫下外源K⁺和SA对幼苗生物量积累、相对含水率、MDA含量、脂膜透性、POD活性、叶绿素含量以及光合特性等生理生长指标的影响,以探讨外源K⁺和SA在缓解融雪剂对油松幼苗生长抑制中的效应关系,为化学融雪剂的污染防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

实验地选在中国科学院大青沟沙地生态实验站(42°13'N,122°22'E),试验于该实验站的可开放式大棚中进行。将2年生的试验用苗油松(*Pinus tabulaeformis*)移植于内径30cm,高25cm的塑料花盆中,每盆装风干沙土5kg,在自然状态下生长3个月后(苗木已恢复正常生长),选择长势一致的正常苗木进行胁迫实验研究。试验选用沈阳浑南新区三英科技有限公司生产的复合型融雪剂,主要离子含量(g/kg)为K⁺11.2±2.9(均值±标准偏差);Ca²⁺67.8±4.3;Na⁺68.2±2.2;Mg²⁺41.3±0.2;Cl⁻395.9±2.5;F⁻10.3±0.8;SO₄²⁻69.3±12.9。按表1的设计方案配置融雪剂、缓释剂KNO₃和水杨酸(SA)处理溶液,每盆一次性施加处理溶液200 mL。以去离子水作为对照,每处理设3个重复(3株苗木)。

表1 试验设计方案
Table 1 Design of the treatment

处理 Treatment	浓度 Concentration	使用量 Volume
H ₂ O	CK 去离子水	200 mL
融雪剂 Deicing salts	T1 0.2% (以干土重量百分比浓度计)	200 mL
KNO ₃ +0.2% 融雪剂	T2 KNO ₃ 10 mmol/L	200 mL
KNO ₃ +0.2% deicing salts	T3 KNO ₃ 20 mmol/L	200 mL
	T4 KNO ₃ 40 mmol/L	200 mL
水杨酸+0.2% 融雪剂	T2' SA 2 mmol/L	200 mL
SA+0.2% deicing salts	T3' SA 4 mmol/L	200 mL
	T4' SA 8 mmol/L	200 mL

1.2 测定指标与方法

处理到20d时取无病虫害、无生理病斑、无机械损伤、相同部位的功能叶片,迅速用保鲜膜包好,带回室内进行生理生化指标的测定。采用称重法测定叶片相对含水率^[24],硫代巴比妥酸比色法测定MDA含量^[25],改进的电导率法测定细胞膜透性^[26],愈创木酚法测定POD活性^[24],紫外分光光度法测定叶绿素的含量^[27]。处理到60d时将根、茎、叶各部分经105℃杀青15 min、70℃烘干至恒量测定生物量。光合作用在胁迫处理后每隔7d于9:00—11:30采用Li-6400便携式光合测定系统(Li-6400,USA)进行光合参数的测定。测定时使用开放气路,叶室温度为(25±1)℃,相对湿度为30%—50%,CO₂浓度在自然条件下约为(300±5) μmol/mol。通过Li-6400红蓝光光源来提供不同的光和有效光辐射,空气流速为0.5 L/s,恒定光照强度(PARi)为1800 μmol·m⁻²·s⁻¹。测定部位为幼苗中位叶(从顶部算起第3层叶片)。净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、细胞间

隙 CO₂ 浓度 (C_i) 由光合测定系统直接读出。测定重复 6 次,取平均数。

2 结果

2.1 外源 K⁺ 和 SA 对融雪剂胁迫下油松生物量积累和相对含水率的影响

0.2% 浓度的融雪剂对油松幼苗的根、茎、叶及株干重均有显著影响 ($P < 0.05$), 分别比对照下降了 43.6%、43.5%、45.7% 和 44.0% (表 2), 可见叶片对融雪剂胁迫相对更为敏感一些。添加 20 mmol/L KNO₃ 明显促进油松幼苗的叶片干重和株干重的增加 ($P < 0.05$), 20 mmol/L KNO₃ 处理下的株干重比 0.2% 融雪剂处理 (T1) 增加了 24.9%, 而 10 mmol/L 和 40 mmol/L KNO₃ 对油松生物量的积累无明显促进作用。2 mmol/L 和 4 mmol/L SA 处理的株干重均高于 T1 处理, 且差异显著, 分别增加了 63.61% 和 48.45%, 且叶片和茎的干重均显著增加, 其中 2 mmol/L SA 处理的株干重缓解效果更为明显, 而 8 mmol/L SA 处理的株干重却下降了 3.93%, 但差异不显著。0.2% 融雪剂对油松叶片含水率有明显抑制作用, 与对照相比下降了 22.11%。20 mmol/L KNO₃ 对油松叶片含水率有显著促进作用, 比 T1 处理增加 18.04%, 而各浓度 SA 处理对幼苗叶片含

表 2 外源 K⁺ 和 SA 对融雪剂胁迫下油松生物量积累和相对含水率的影响

Table 2 Effect of exogenous potassium and SA on dry weights and water content of *Pinus tabulaeformis* under deicing salts stress

处理 Treatment		叶 Leaf/g	茎 Stem/g	根 Root/g	株干重 Total/g	叶含水率 Water content/%
CK	去离子水	67.3±3.6a	32.6±5.8a	28.1±2.3a	128.0±4.6a	61.0±2.3a
T1	0.2% 融雪剂	38.0±1.2c	18.4±1.3b	15.3±0.2b	71.7±2.3c	47.5±1.1c
T2	10mmol/L KNO ₃ +0.2% 融雪剂	37.2±0.7c	17.9±2.2b	17.4±0.8b	72.5±1.8c	47.9±1.8c
T3	20mmol/L KNO ₃ +0.2% 融雪剂	45.4±4.7b	24.6±2.0ab	19.5±2.9b	89.5±8.3b	52.0±1.4b
T4	40mmol/L KNO ₃ +0.2% 融雪剂	26.9±0.4d	14.2±0.7b	14.6±2.1b	55.7±1.8d	42.3±1.0d
CK	去离子水	67.3±3.6a	32.6±5.8a	28.1±2.3a	128.0±4.6a	61.0±2.3a
T1	0.2% 融雪剂	38.0±1.2b	18.4±1.3b	15.3±0.2b	71.7±2.3c	47.5±1.1b
T2'	2mmol/L SA+0.2% 融雪剂	67.3±5.6a	29.3±1.0a	20.8±2.2ab	117.3±3.2ab	46.1±2.0b
T3'	4mmol/L SA +0.2% 融雪剂	64.7±3.0a	26.2±2.3a	15.5±1.5b	106.4±2.6b	42.1±1.1c
T4'	8mmol/L SA +0.2% 融雪剂	30.3±3.5b	23.0±2.3ab	15.6±0.9b	68.9±4.8c	40.4±3.8c

不同的字母表示 CK—T4 不同处理间和 CK—T4' 不同处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$)

水率缓解效应均不显著。

2.2 外源 K⁺ 和 SA 对融雪剂胁迫下油松 MDA 含量和细胞膜透性的影响

0.2% 融雪剂胁迫下油松幼苗的叶片 MDA 含量和相对电导率均显著增加 (图 1)。与 0.2% 融雪剂处理相比, 10 mmol/L 和 20 mmol/L KNO₃ 处理的 MDA 含量分别降低了 2.8% 和 21.3%, 而 40 mmol/L KNO₃ 处理的 MDA 含量却增加了 11.5%。2 mmol/L 和 4 mmol/L SA 处理的幼苗叶片的 MDA 含量分别下降了 20.6% 和 16.3%。相对电导率的变化趋势与 MDA 一致, 与 0.2% 融雪剂处理相比, 20 mmol/L KNO₃ 处理的相对电导率降低了 8.8%, 2 mmol/L SA 处理的相对电导率降低了 3.7%。结果表明, 一定浓度的 KNO₃ 和 SA 具有降低膜脂过氧化作用, 减轻膜脂过氧化对植物细胞的伤害, 并且以 20 mmol/L KNO₃ 和 2 mmol/L SA 处理的缓解效果最为明显。

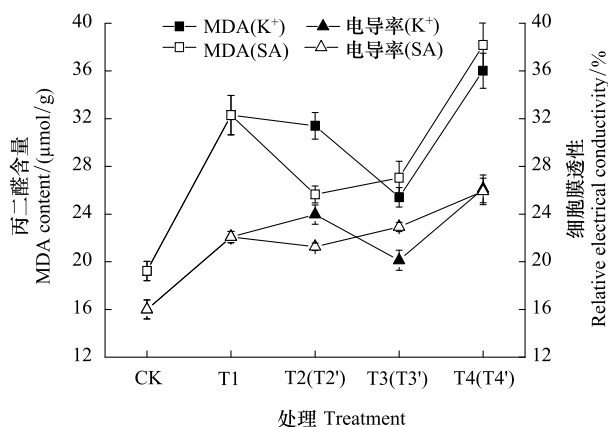


图 1 外源 K⁺ 和 SA 对融雪剂胁迫下油松 MDA 含量和细胞膜透性的影响

Fig.1 Effect of exogenous potassium and SA on MDA content and permeability of cell membrane of *Pinus tabulaeformis* under deicing salts stress

CK: H₂O; T1: 0.2% 融雪剂; T2: 0.2% 融雪剂+10 mmol/L KNO₃; T3: 0.2% 融雪剂+20 mmol/L KNO₃; T4: 0.2% 融雪剂+40 mmol/L KNO₃; T2': 0.2% 融雪剂+2mmol/L SA; T3': 0.2% 融雪剂+4mmol/L SA; T4': 0.2% 融雪剂+8mmol/L SA

2.3 外源 K^+ 和 SA 对融雪剂胁迫下油松 POD 活性的影响

0.2% 浓度的融雪剂对油松 POD 活性有明显的抑制作用(图 2), 10 mmol/L、20 mmol/L KNO_3 和 2 mmol/L SA 处理的幼苗叶片的 POD 活性分别比 T1 处理的增加 4.4%、7.5% 和 6.3%, 其中 20 mmol/L KNO_3 和 2 mmol/L SA 处理的 POD 活性显著增加, 而 40 mmol/L KNO_3 和 4 mmol/L、8 mmol/L SA 对油松的 POD 活性有显著的抑制作用($P < 0.05$)。表明一定浓度的钾盐和 SA 提高了融雪剂胁迫条件下 POD 酶的活性, 不同程度地减轻了油松幼苗的胁迫伤害。

2.4 外源 K^+ 和 SA 对融雪剂胁迫下油松叶绿素含量的影响

0.2% 浓度的融雪剂处理对油松叶绿素含量有明显的抑制作用(图 3)。不同浓度的钾盐对融雪剂胁迫条件下叶绿素的含量影响不同, 加入 10 mmol/L KNO_3 处理的幼苗叶绿素含量有所上升, 但是差异不显著($P > 0.05$), 20 mmol/L KNO_3 处理显著提高了幼苗的叶绿素含量, 40 mmol/L KNO_3 处理反而对幼苗的叶绿素含量有抑制作用。2 mmol/L SA 处理的幼苗叶片的叶绿素含量略高于 T1 处理, 但缓解效果并不显著($P > 0.05$), 而 4 mmol/L 和 8 mmol/L SA 处理的幼苗叶片的叶绿素含量却低于 T1 处理, 表明较高浓度的 SA 对幼苗叶片叶绿素含量反而产生抑制作用。

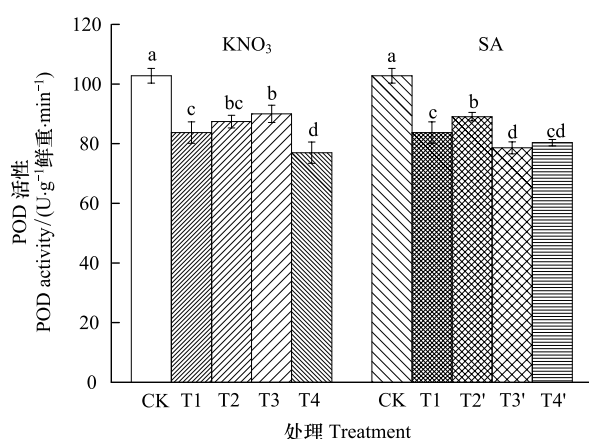


图2 外源 K^+ 和 SA 对融雪剂胁迫下油松 POD 活性的影响

Fig. 2 Effect of exogenous potassium and SA on POD activity of *Pinus tabulaeformis* under deicing salts stress

CK: H_2O ; T1: 0.2% 融雪剂; T2: 0.2% 融雪剂 + 10 mmol/L KNO_3 ; T3: 0.2% 融雪剂 + 20 mmol/L KNO_3 ; T4: 0.2% 融雪剂 + 40 mmol/L KNO_3 ; T2': 0.2% 融雪剂 + 2 mmol/L SA; T3': 0.2% 融雪剂 + 4 mmol/L SA; T4': 0.2% 融雪剂 + 8 mmol/L SA

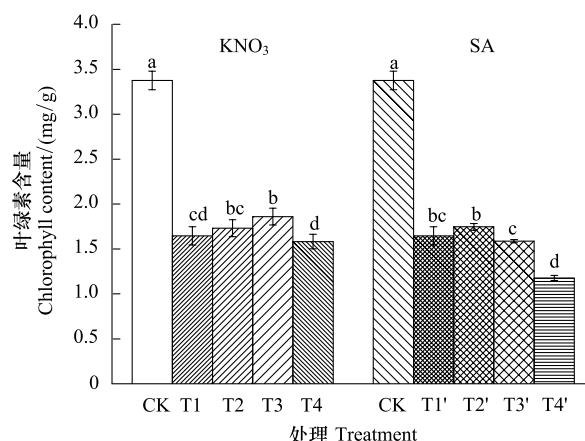


图3 外源 K^+ 和 SA 对融雪剂胁迫下油松叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effect of exogenous potassium and SA on chlorophyll content of *Pinus tabulaeformis* under deicing salts stress

CK: H_2O ; T1: 0.2% 融雪剂; T2: 0.2% 融雪剂 + 10 mmol/L KNO_3 ; T3: 0.2% 融雪剂 + 20 mmol/L KNO_3 ; T4: 0.2% 融雪剂 + 40 mmol/L KNO_3 ; T2': 0.2% 融雪剂 + 2 mmol/L SA; T3': 0.2% 融雪剂 + 4 mmol/L SA; T4': 0.2% 融雪剂 + 8 mmol/L SA

2.5 外源 K^+ 和 SA 对融雪剂胁迫下油松光合特性的影响

与对照相比, 各处理叶片净光合速率(P_n)均显著下降, 且随着胁迫时间的延长, 胁迫处理的 P_n 值下降程度也逐渐加大(图 4)。20 mmol/L KNO_3 处理(T3)的 P_n 值在各个处理时间均显著高于 0.2% 融雪剂处理(T1) ($P < 0.05$), 在 7、14、21、28、35d 分别增加了 5.8%、17.6%、19.3%、16.6% 和 20.6%, 表明一定浓度的钾处理对融雪剂胁迫有一定的缓解作用。而 10 mmol/L KNO_3 处理(T2)的 P_n 值在各个处理时间与 T1 相比差异并不显著($P > 0.05$), 40 mmol/L KNO_3 (T4)处理的 P_n 值均低于 T1 处理, 且在 7、14、21d 差异显著($P < 0.05$)。2 mmol/L (T2') 和 4 mmol/L SA 处理(T3')的幼苗叶片的 P_n 值从 21d 开始高于 T1 处理但差异并不显著($P > 0.05$), 而 8 mmol/L SA 处理(T4')的幼苗叶片的 P_n 值显著低于 T1 处理, 产生一定的抑制作用。

与对照相比, 随着胁迫处理时间的延长, 各处理叶片 C_i 值呈现先下降后上升的总趋势(图 4)。在处理前期(7—21d), 各处理的油松的 C_i 显著低于对照, 且呈下降趋势, 但是随着处理时间的延长, C_i 开始上升。20

mmol/L KNO_3 处理的叶片 C_i 值与 0.2% 融雪剂处理相比差异不显著,而 10 mmol/L 和 40 mmol/L KNO_3 处理的 C_i 显著低于 T1 处理;SA 各处理叶片 C_i 值均显著低于对照,且呈下降趋势。油松幼苗叶片的气孔限制值 (L_s) 的变化趋势与 C_i 基本相反(具体数据未列出),各处理叶片 L_s 值呈现先上升后下降的总趋势,且显著高于对照。各处理对油松幼苗的叶片气孔导度 (G_s) 均显著低于对照水平。20 mmol/L KNO_3 处理的叶片 G_s 值与 0.2% 融雪剂处理(T1)相比差异不显著,而 10 mmol/L 和 40 mmol/L KNO_3 处理的 G_s 显著低于 T1。与 T1 处理相比,2、4 mmol/L 和 8 mmol/L SA 处理的幼苗叶片的 G_s 值较低,且随着处理时间的延长,下降幅度也不断增大。

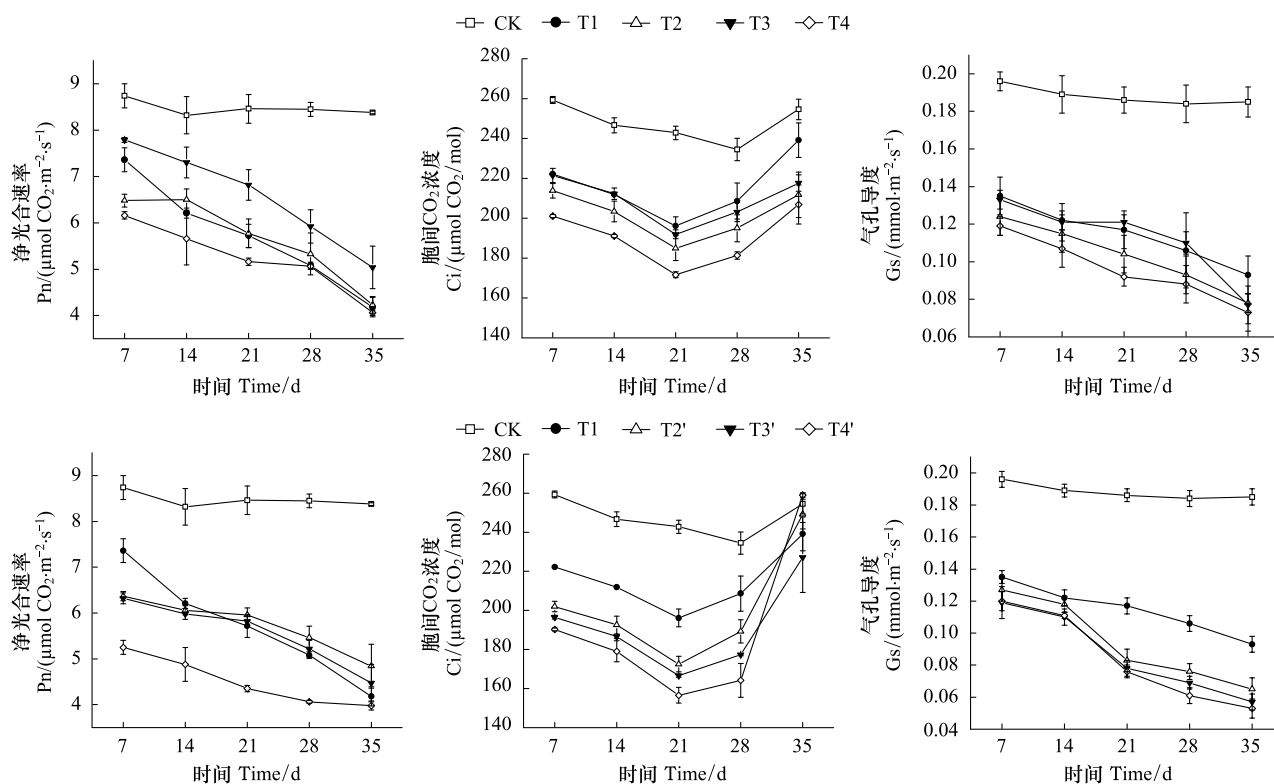


图4 外源 K^+ 和 SA 对融雪剂胁迫下油松净光合速率 (P_n), 胞间 CO_2 浓度 (C_i) 和气孔导度 (G_s) 的影响

Fig. 4 Effect of exogenous potassium and SA on net photosynthetic rates (P_n), intracellular CO_2 concentrations (C_i) and stomatal conductance (G_s) in the leaves of *Pinus tabulaeformis* under deicing salts stress

CK; H_2O ; T1: 0.2% 融雪剂; T2: 0.2% 融雪剂+10 mmol/L KNO_3 ; T3: 0.2% 融雪剂+20 mmol/L KNO_3 ; T4: 0.2% 融雪剂+40 mmol/L KNO_3 ; T2': 0.2% 融雪剂+2mmol/L SA; T3': 0.2% 融雪剂+4mmol/L SA; T4': 0.2% 融雪剂+8mmol/L SA

3 讨论

融雪剂对植物生长的抑制机理十分复杂,融雪剂的不同组分和同一组分的不同比例、不同植物和同一植物不同器官和不同发育阶段以及暴于盐渍条件时间的长短都可以产生不同的结果,盐分的抑制机理也不相同。本研究结果证明,一定浓度的外源 K^+ 和 SA 在明显增加油松幼苗生物量积累的同时,幼苗相对含水量提高,叶片中因 POD 活性增强致使膜脂过氧化水平(MDA 的积累)和质膜透性(相对电导率)降低,同时叶绿素含量的提高也促进了光合作用的进行。可见,外源 K^+ 和 SA 的缓解效应和上述生理生化指标的变化密切相关,表明二者很有可能通过影响幼苗上述生理生化变化从而缓解融雪剂对油松的生长抑制。

植物的水分状况与植物生长直接相关,外源 K^+ 添加能够通过维持液泡和胞质内 K^+ 的浓度,提高其渗透调节能力,缓解 Na^+ 对植物的渗透胁迫。Erdei 和 Kuiper^[28] 的研究表明盐逆境下介质 K^+ 的增多能提高植株生长 30% 以上。本研究中,加入 20 mmol/L KNO_3 可使油松幼苗生物量增加 24.9%,叶片含水率增加 18.0% (表 2),说明该浓度钾盐能够明显提高叶片的含水量,减轻了盐分胁迫导致的水分亏缺和由此带来的次生伤

害,从而缓解了融雪剂对油松幼苗的生长抑制。然而 K^+ 作用的大小与外源 K^+ 浓度密切相关。Neid 和 Biesboer^[29] 的研究显示,低浓度的 KNO_3 可以有效缓解草坪草由于盐害造成的低发芽率,而高浓度的 KNO_3 对草坪草的萌发抑制作用显著。本研究中,40 mmol/L KNO_3 导致盐害的进一步加剧,这与晏斌等^[16] 的研究结果也一致,其原因可能与 K^+ 浓度过高形成的渗透胁迫有关。2 mmol/L SA 处理油松幼苗生物量积累增加 63.6%,但各浓度的 SA 对油松叶片含水率的影响均不显著,分析其原因可能为本研究中 SA 的各个浓度对油松幼苗渗透调节作用或根系吸收水分和向上运输的效率并不明显,其干物质量的积累仍取决于矿质营养的吸收和运输以及光合作用等其他生理过程^[28]。

POD 是一种含 Fe 的蛋白质,是细胞内清除活性氧系统中的重要酶,能有效地阻止活性氧自由基 $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 在植物体内积累,使细胞内自由基维持在较低水平,防止细胞膜脂过氧化的加剧^[30]。MDA 含量的高低和细胞质膜透性(相对电导率)的变化是反映细胞膜脂过氧化作用强弱和质膜破坏程度的重要指标^[31]。由图 1 所示,MDA 含量变化与相对电导率高低密切相关,表明融雪剂胁迫下膜脂过氧化加剧是质膜完整性丧失的重要原因。在 0.2% 融雪剂处理下,油松幼苗叶片 MDA 含量和相对电导率均显著增加,20 mmol/L KNO_3 处理使 MDA 含量降低 21.3%,相对电导率降低 8.8%;2 mmol/L SA 处理的 MDA 含量下降 20.6%,相对电导率降低 3.7%。同时 20 mmol/L KNO_3 和 2 mmol/L SA 处理的 POD 活性分别比 0.20% 融雪剂处理的增加 7.5% 和 6.3%,这表明该浓度的外源 K^+ 和 SA 供应能够诱导 POD 活性的增加,增强了植株的活性氧清除能力,有效缓解了膜脂过氧化作用,降低了 MDA 含量,从而维持了细胞膜的稳定性,这一结论与余小平等对黄瓜幼苗的相关研究一致^[20]。

融雪剂胁迫可通过抑制为植物提供物质的光合作用进而影响植物的生长^[32-33]。本研究中 0.2% 融雪剂处理叶片 Pn 、 Ci 和 G_s 与对照相比均显著下降,且随胁迫时间的延长,幼苗叶片 Pn 值下降程度也逐渐加大。20 mmol/L KNO_3 和 2 mmol/L SA 均能在一定程度上提高植物幼苗的净光合速率和叶绿素含量(图 3、图 4),但对叶片 Ci 和 G_s 的缓解作用不显著。其促进油松的光合速率可能与叶绿素含量提高有关,可能通过有效避免有害离子进入叶片光合组织,增强类囊体膜的稳定性,促进幼苗叶片光合色素的合成或阻止其氧化降解,以维持光合机构较高的光合活性,减缓光合速率的下降,Noreen 和 Ashraf^[34] 对向日葵、王魏^[35] 等对菠菜的研究中也有类似报道。此外,20 mmol/L KNO_3 对油松净光合速率的缓解作用优于 2 mmol/L SA,可能与外源 K^+ 调节气孔开、关过程中的重要作用有关^[36],这与 20 mmol/L KNO_3 处理下 G_s 升高的实验结果相一致(图 4)。

4 结论

外源添加 20 mmol/L KNO_3 和 2 mmol/L SA 能有效缓解 0.2% 浓度的融雪剂对油松幼苗生长的抑制,分别增加生物量 24.9% 和 63.6%。同时,该浓度的 KNO_3 和 SA 可显著促进活性氧清除系统中 POD 活性,降低膜脂过氧化水平,维持膜系统的完整性,进而改善细胞的代谢功能。虽然两种缓释剂对油松幼苗叶片胞间 CO_2 浓度和气孔导度的缓解作用并不显著,但其可通过提高叶绿素含量促进光合作用的进行。本试验是在盆栽模拟条件下进行的,当城市行道树受融雪剂危害时,可以考虑采用外源添加适宜浓度的 K^+ 和 SA 处理,但缓释剂的配比、成本以及具体的施用方式等还需进一步研究。研究结果将为进一步探索开发行道树盐害缓释剂和同类地区城市化学融雪剂的污染防治提供科学依据。

References:

- [1] Yan X, Li F Y, Liu T W, Zhang Y, Ma X P, Wang X J. Effects of deicing chemicals on ecological environment. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(12): 2209-2214.
- [2] Ramakrishna D, Viraraghavan T. Environmental impact of chemical deicers—a review. Water Air Soil Pollution, 2005, 166: 49-63.
- [3] Cunningham A M, Snyder E, Yonkin D, Ross M, Elsen T. Accumulation of deicing salts in soils in an urban environment. Urban Ecosystems, 2008, 11: 17-31.
- [4] Richburg J A, Patterson W A, Lowenstein F. Effects of road salt and *Phragmites australis* invasion on the vegetation of a western Massachusetts calcareous lake-basin fen. Wetlands, 2001, 21: 247-255.

- [5] Zhu X G, Zhang Q D. Advances in the research on the effects of NaCl on photosynthesis. Chinese Bulletin of Botany, 1999, 16(4): 332-338.
- [6] Xue Z C, Gao H Y, Liu J. Different response of photosynthetic apparatus between wild soybean (*Glycine soja*) and cultivated soybean (*Glycine max*) to NaCl stress. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(11): 3101-3109.
- [7] Viskari E L, Karenlampi L. Road Scots pine as an indicator of deicing salt use—a comparative study from two consecutive winters. Water Air Soil Pollution, 2000, 122: 405-409.
- [8] Wang S P, Guo S R, Hu X H, Jia Y X, Jiao Y S. Effects of NaCl stress on K^+ , Na^+ and Cl^- allocation in different organs of *Cucumis sativus* L. seedlings. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(3): 348-354.
- [9] Yan X, Li F Y, Liu T W, Zhang Y. Effects of chemical deicers on the germination of wheat and maize seeds. Journal of Meteorology and Environment, 2007, 23(4): 62-66.
- [10] Kayama M, Quoreshi A M, Kitaoka S, Kitahashi Y, Sakamoto Y, Maruyama Y, Kitao M, Koike T. Effects of deicing salt on the vitality and health of two spruce species, *Picea abies* Karst., and *Picea glehnii* Masters planted along roadsides in northern Japan. Environmental Pollution, 2003, 124: 127-137.
- [11] Cekstere G, Nikodemus O, Osvalde A. Toxic impact of the de-icing material to street greenery in Riga, Latvia. Urban Forestry & Urban Greening, 2008, 7: 207-217.
- [12] Mäser P, Gierth M, Schroeder J I. Molecular mechanisms of potassium and sodium uptake in plants. Plant and Soil, 2002, 247(1): 43-54.
- [13] Zhou F, Li P H, Wang B S. The relationship between the K^+ homeostasis and plant salt tolerance. Plant Physiology Communication, 2003, 39(1): 67-70.
- [14] Szepesi Á, Csiszár J, Gémes K, Horváth E, Horváth F, Simon M L, Tari I. Salicylic acid improves acclimation to salt stress by stimulating abscisic aldehyde oxidase activity and abscisic acid accumulation, and increases Na^+ content in leaves without toxicity symptoms in *Solanum lycopersicum* L. Journal of Plant Physiology, 2009, 166: 914-925.
- [15] Kovácik J, Klejdus B, Hedbavny J, Bačkor M. Salicylic acid alleviates NaCl-induced changes in the metabolism of *Matricaria chamomilla* plants. Ecotoxicology, 2009, 18: 544-554.
- [16] Yan B, Dai Q J. Effect of external K^+ level on salt tolerance of rice seedlings. Chinese Journal of Rice Science, 1994, 8(2): 119-122.
- [17] Zhang S G, Gao J Y. Mitigative Effects of salicylic acid and aspirin on salt stress-induced injuries in wheat (*Triticum aestivum* L.). Acta Phytobiologica Sinica, 1999, 25(2): 159-164.
- [18] Khodary S E A. Effects of salicylic acid on the growth, photosynthesis and carbohydrate Metabolism in salt stress Maize plant. International Journal of Agriculture & Biology, 2004, 6(1): 5-8.
- [19] Nazar R, Iqbal N, Syeed S, Khan N A. Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under salt stress by enhancing nitrogen and sulfur assimilation and antioxidant metabolism differentially in two mungbean cultivars. Journal of Plant Physiology, 2011, 168: 807-815.
- [20] She X P, He J M, Zhang J, Zou Q C. Mitigative effect of salicylic acid on salt stress-induced growth inhibition in cucumber seedling. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2002, 22(2): 401-405.
- [21] Borsami O, Valpuesta V, Botella M A. Evidence for a role of salicylic acid in the oxidative damage generated by NaCl and osmotic stress in *Arabidopsis* seedlings. Plant Physiology, 2001, 126(3): 1024-1030.
- [22] Cong R C, Li F, Gu R Z. Studying on how the snow-melting agent injures the plants in city. Chinese Landscape Architecture, 2005, 12: 60-64.
- [23] Peng H P. Death causes of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) at the Tiananmen Square in spring 2010 and technical measures. Journal of Agriculture, 2011, 1: 44-49.
- [24] Li H S. Principles and Techniques for Plant Physiological Biochemical Experiment. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164-167.
- [25] Zhao S J, Xu C C, Zou Q, Meng Q W. Improvements of method for measurement of malondialdehyde in plant tissues. Plant Physiology Communication, 1994, 30(3): 207-210.
- [26] Yang X Y, Yang J S. Effects of salt stress on growth of ryegrass seedlings and its mitigative effects of P fertilizer. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(6): 899-902.
- [27] Zhang X Z. Crop physiology research methods. Beijing: China Agriculture Press, 1992: 195-200.
- [28] Erdei L, Kuiper P J C. Substrate-dependent modulation of ATPase activity by Na^+ and K^+ in roots of *Plantago* species. Physiologia Plantarum, 1980, 49(1): 71-77.
- [29] Neid S L, Biesboer D D. Alleviation of salt-induced stress on seed emergence using soil additives in a greenhouse. Plant and Soil, 2005, 268: 303-307.
- [30] Lu J J, Duo L A, Liu X J. Changes in SOD and POD activity and free proline content of *Lolium perenne* and *Festuca elata* leaves under different levels of salt stress. Bulletin of Botanical Research, 2004, 24(1): 115-119.
- [31] Li M, Wang G X. Effect of Drought Stress on Activities of Cell Defense Enzymes and Lipid Peroxidation in *Glycyrrhiza uralensis* Seedlings. Acta

Ecologica Sinica, 2002, 22(4): 503-507.

- [32] Delfine S, Alvino A, Villani M C, Loreto F. Restrictions to carbon dioxide conductance and photosynthesis in spinach leaves recovering from salt stress. *Plant Physiology*, 1999, 119 (3): 1101-1106.
- [33] Hui H X, Xu X, Li S M. Possible mechanism of inhibition on photosynthesis of *Lycium barbarum* under salt stress. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1): 5-9.
- [34] Noreen S, Ashraf M. Alleviation of adverse effects of salt stress on sunflower (*Helianthus annuus* L.) by exogenous application of salicylic acid: growth and photosynthesis. *Pakistan Journal of Botany*, 2008, 40(4): 1657-1663.
- [35] Wang W. Mitigative effect of exogenous chemical substances on in Spinach under NaCl stress [D]. Shan Xi: Northwest A & F University, 2008.
- [36] Meathuie F J M, Sanders D. Mechanism of potassium absorption by higher plant roots. *Physiologia Plantarum*, 1996, 96 (1): 158-168.

参考文献:

- [1] 严霞, 李法云, 刘桐武, 张营, 马溪平, 王效举. 化学融雪剂对生态环境的影响. *生态学杂志*, 2008, 27(12): 2209-2214.
- [5] 朱新广, 张其德. NaCl 对光合作用影响的研究进展. *植物学通报*, 1999, 16(4): 332-338.
- [6] 薛忠财, 高辉远, 柳洁. 野生大豆和栽培大豆光合机构对 NaCl 胁迫的不同响应. *生态学报*, 2011, 31(11): 3101-3109.
- [8] 王素平, 郭世荣, 胡晓辉, 贾永霞, 焦彦生. NaCl 胁迫对黄瓜幼苗体内 K^+ 、 Na^+ 和 Cl^- 分布的影响. *生态学杂志*, 2007, 26(3): 348-354.
- [9] 严霞, 李法云, 刘桐武, 张营. 化学融雪剂对小麦和玉米种子发芽的影响. *气象与环境学报*, 2007, 23(4): 62-66.
- [13] 周峰, 李平华, 王宝山. K^+ 稳态与植物耐盐性的关系. *植物生理学通讯*, 2003, 39(1): 67-70.
- [16] 晏斌, 戴秋杰. 外界 K^+ 水平对水稻幼苗耐盐性的影响. *中国水稻科学*, 1994, 8(2): 119-122.
- [17] 张士功, 高吉寅. 水杨酸和阿斯匹林对小麦盐害的缓解作用. *植物生理学报*, 1999, 25(2): 159-164.
- [20] 余小平, 贺军民, 张键, 邹庆春. 水杨酸对盐胁迫下黄瓜幼苗生长抑制的缓解效应. *西北植物学报*, 2002, 22(2): 401-405.
- [22] 丛日晨, 李芳, 古润泽. 融雪剂对城市园林植物伤害机理的研究. *中国园林*, 2005, 12: 60-64.
- [23] 彭海平. 天安门广场油松 2010 年春季死亡原因及技术措施. *农学学报*, 2011, 1: 44-49.
- [24] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000: 164-167.
- [25] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 孟庆伟. 植物组织中丙二醛测定方法的改进. *植物生理学通讯*, 1994, 30(3): 207-210.
- [26] 杨晓英, 杨劲松. 盐胁迫对黑麦草幼苗生长的影响及磷肥的缓解作用. *土壤通报*, 2005, 36(6): 899-902.
- [27] 张宪政. 作物生理研究法. 北京: 农业出版社, 1992: 195-200.
- [30] 卢静君, 多立安, 刘祥君. 盐胁迫下两草种 SOD 和 POD 及脯氨酸动态研究. *植物研究*, 2004, 24(1): 115-119.
- [31] 李明, 王根轩. 干旱胁迫对甘草幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响. *生态学报*, 2002, 22(4): 503-507.
- [33] 惠红霞, 许兴, 李守明. 盐胁迫抑制枸杞光合作用的可能机理. *生态学杂志*, 2004, 23(1): 5-9.
- [35] 王魏. 外源生长调节物质对 NaCl 胁迫下菠菜的缓解效应[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2008.

CONTENTS

Growth and physiological adaptation of <i>Messerschmidia sibirica</i> to sand burial on coastal sandy	WANG Jin, ZHOU Ruilian, ZHAO Halin, et al (4291)
Alleviation effect and mechanism of exogenous potassium nitrate and salicylic acid on the growth inhibition of <i>Pinus tabulaeformis</i> seedlings induced by deicing salts	ZHANG Ying, LI Fayun, YAN Xia, et al (4300)
Influence of different spatial-scale factors on stream macroinvertebrate assemblages in the middle section of Qiantang River Basin	ZHANG Yong, LIU Shuoru, YU Haiyan, et al (4309)
Species diversity and distribution pattern of non-volant small mammals along the elevational gradient on eastern slope of Gongga Mountain	WU Yongjie, YANG Qisen, XIA Lin, et al (4318)
A patch-based method for mechanism analysis on spatial dynamics of mangrove distribution	LI Chungan, LIU Suqing, FAN Huangqing, et al (4329)
Nutrient heterogeneity in fine roots of six subtropical natural tree species	XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (4343)
Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province	HE Yue, FAN Gaofeng, ZHANG Xiaowei, et al (4352)
Heterogeneity in fine root respiration of six subtropical tree species	ZHENG Jinxing, XIONG Decheng, HUANG Jinxue, et al (4363)
Characteristics of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea abundance in soil organic layer under the subalpine/alpine forest	WANG Ao, WU Fuzhong, HE Zhenhua, et al (4371)
Effect of tillage systems on light fraction carbon in a purple paddy soil	ZHANG Junke, JIANG Changsheng, HAO Qingju, et al (4379)
Effects of prescribed fire on carbon sequestration of long-term grazing-excluded grasslands in Inner Mongolia	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui, et al (4388)
Stoichiometry of carbon dioxide and methane emissions in Minjiang River estuarine tidal wetland	WANG Weiqi, ZENG Congsheng, TONG Chuan, et al (4396)
Distribution and sources of particulate organic carbon in the Pearl River Estuary in summer 2010	LIU Qingxia, HUANG Xiaoping, ZHANG Xia, et al (4403)
The glucose-utilizing bacterial diversity in the cold spring sediment of Shawan, Xinjiang, based on stable isotope probing	CHU Min, WANG Yun, ZENG Jun, et al (4413)
Culture-dependent and culture-independent approaches to studying soil microbial diversity	LIU Guohua, YE Zhengfang, WU Weizhong (4421)
The classification of plant functional types based on the dominant herbaceous species in the riparian zone ecosystems in the Yiluo River	GUO Yili, LU Xunling, DING Shengyan (4434)
Genetic diversity of different eco-geographical populations in endangered plant <i>Prunus mongolica</i> by ISSR Markers	ZHANG Jie, WANG Jia, LI Haoyu, ZHANG Huirong, et al (4443)
Ecophysiological characteristics of higher-latitude transplanted mangrove <i>Kandelia candel</i> in strong tidal range area	ZHENG Chunfang, QIU Jianbiao, LIU Weicheng, et al (4453)
The effect of artificial warming during winter on white clover (<i>Trifolium repens</i> Linn): overwintering and adaptation to coldness in late spring	ZHOU Ruilian, ZHAO Mei, WANG Jin, et al (4462)
Estimating fine root production and mortality in subtropical <i>Altingia grilipes</i> and <i>Castanopsis carlesii</i> forests	HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (4472)
The cloning and expression of WUE-related gene (<i>PdEPF1</i>) in <i>Populus deltoides</i> × <i>Populus nigra</i>	GUO Peng, JIN Hua, YIN Weilun, et al (4481)
The allelopathy of aquatic rhizome and root extract of <i>Thalia dealbata</i> to seedling of several aquatic plants	MIAO Lihua, WANG Yuan, GAO Yan, et al (4488)
Effect of the avirulent strain of <i>Ralstonia solanacearum</i> on the ecological characteristics of microorganism fatty acids in the rhizosphere of tobacco	ZHENG Xuefang, LIU Bo, LAN Jianglin, et al (4496)
Coupling remotely sensed information with a rice growth model by combining updating and assimilation strategies	WANG Hang, ZHU Yan, MA Mengli, et al (4505)
Effects of water temperature and body weight on metabolic rates of Yellowtail clownfish <i>Amphiprion clarkii</i> (Pisces: Perciformes) during larval development	YE Le, YANG Shengyun, LIU Min, et al (4516)
The distribution of chlorophyll a in the Southwestern Indian Ocean in summer	HONG Lisha, WANG Chunsheng, ZHOU Yadong, et al (4525)
Evaluation of the effects of ecological remediation on the water quality and biological toxicity of Dagou Drainage River in Tianjin	WANG Min, TANG Jingchun, ZHU Wenyong, et al (4535)
Quantitative dynamics of adult population and 3-D spatial pattern of <i>Ceoporus variabilis</i> (Baly)	WANG Wenjun, LIN Xuefei, ZOU Yunding, et al (4544)
Review and Monograph	
Studies on urban heat island from a landscape pattern view: a review	CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding (4553)
Sediment quality triad and its application in coastal ecosystems in recent years	WU Bin, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (4566)
Discussion	
Food waste management in China: status, problems and solutions	HU Xinjun, ZHANG Min, YU Junfeng, et al (4575)
Scientific Note	
Effects of microchemical substances in anaerobic fermented liquid from rice straw and cyanobacteria on <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>niveum</i> growth	LIU Aimin, XU Shuangsoo, CAI Xin, et al (4585)
Ecological benefit-loss analysis of agricultural ecosystem in Foshan City, China	YE Yanqiong, ZHANG Jiaen, QIN Zhong, et al (4593)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 14 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 14 (July, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@csbg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@csbg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元